

聯 合國為了因應日益嚴重的環境汙染與資源匱乏問題，由前挪威總理布倫特蘭（Gro Harlem Brundtland）女士為首，組成「世界環境與發展委員會」（WCED）謀求解決之道。據其1987年的報告書，永續發展的定義是：「能滿足當代所需但不損及後代滿足其所需之發展」；雖然最初的重點是就工業而言，但漸形成國際文明中之一重要思潮，也是人類追求的方向。1993年，聯合國又成立了「永續發展委員會」（UNCSD），主掌宣導與推展，除了加強人們認識自然、保護環境的觀念外，並採取積極態度，以創新的發明及設計來促成世界進步，使環境、經濟和人類社會得以同時永續發展。

維持永續世界的主要問題有六，包括：人口增長、能源匱乏、氣候異變、資源枯竭、糧食供應、環境毒物等，皆與化學及化學工業息息相關，「永續化學」（sustainable chemistry 或 Nachhaltige Chemie）觀念由此而生。1998年，國際經濟合作暨發展組織（OECD）主辦一場研習會，乃以「發明、設計和利用化學產品和化學製程，以減少或消除有害物質的使用與生產」為永續化學的定義；也可說是藉化學原理之

探索、化學工程之實踐，促成人類的永續發展。

然台灣甚多人士只知「保護」環境，常持消極態度和負面行為對待工業生產及開發建設；或不正確了解相關科技的本質，而引入不適在台灣發展者；相關的教育也不受重視，在在有礙於進步、成長及國際競逐，亟需改進〔註一〕。

續生性能源的提出

甫於今（2007）年元月就任美國耶魯大學講座教授，前美國環保署的艾納斯塔（Paul T. Anastas）博士曾於1998年，和波士頓麻州大學的華納（John C. Warner）教授列出「永續化學十二原則」，第七項為「只要技術可行並符合經濟效益，應使用續生性（renewable）原料」。

2003年，艾納斯塔博士又和密西根大學的齊默曼（Julie Zimmerman）博士提出了永續工程（green engineering）十二原則，其末項也強調使用續生性的能源及物料，這些原則現已為化學界與化學工程界普遍接受。其中，所謂續生性能源包括自然界供給不斷

《油園今夢》

追求永續—— 從認識生質能源開始

7

為嘗試解決氣候與能源的困境，永續化學的發展目標之一就是開發生質能源。博覽會的最終站希望大家好好來認識生質燃料，藉此謹慎思考並選擇真正適合我們的能源。

劉廣定

者，如日光、風和水力等，以及可於較短期內形成者，如植物的油脂、纖維、澱粉等；惟一般人對後者了解不多，且常有誤解。

《論語》有云「知之為知之，不知為不知，是知也」，故若雖不知也不強以為知，而願虛心求知，不知並不為患；但麻煩的是，有些人強以不知為知，自以為是，或信無知者之譏言，卻不肯聽信知者之建言。這些人如果是制定國家政策者或政策執行者，則國力必將日漸衰退，台灣近年的能源政策即是一例。

例如，抵制核能發電者宣稱應以風力代替，殊不知台灣因地形關係，風力發電量有限，目前僅占總發電量約 0.2%，估計將來至多可達 1%；而目前核能發電量約為總發電量 20%！如何取代？另一常為多數人誤解的，就是生質能源（bioenergy）。

生質燃料好處多嗎

上文已述及，永續世界當前的難題包括了能源和氣候，兩者又密切關聯。蓋燃燒煤、石油、天然氣等化石燃料，會造成空氣汙染與溫室效應，而這些化石燃料可能到 2050 年即將用罄。故嘗試利用可不斷新生的生質物（biomass）為來源以製生質燃料（biofuel）開發生質能源，是為永續化學之一發展主題。

生質物是指活體或死亡不久的有機體和一些代謝產物，如牛、馬糞等。從生質物得到的燃料稱為生質燃料，可為固、液、氣體等不同形態，皆屬續生性能源。上古人類「燧人氏」鑽木取火，即是利用固體的生質燃料。各科技先進國且早已進行各方面的研發，近年來以液體生質燃料的進展為最快，其中生質乙醇（bioethanol）和生質柴油（biodiesel）等皆已廣泛利用，台灣則才將開始採用。

很多人認為使用生質燃料，除了可代替部分化石燃料以延長其使用期，還有減少產生二氧化碳，或吸

收大氣中二氧化碳、燃燒後排放更乾淨的氣體等優點；也有人以為，生質燃料產生的能量比化石燃料為多，但實際上並不盡然。

生質乙醇的優缺點

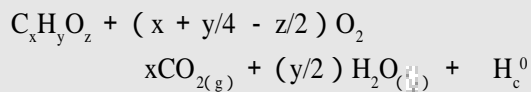
生質乙醇是由植物或一般農作物，將所含的蔗糖，或將他種醣類分子如澱粉、纖維素，先分解成為葡萄糖，再經酵母醱酵製成的乙醇。將之與汽油摻和，可直接用為燃料，有人稱之為汽醇（gashol）。巴西於 1970 年代試用成功，乃大量生產甘蔗，製造乙醇，其政府規定汽車燃料中，乙醇含量須達 22%（稱為 E22）。美國則以生產過剩的玉米製造乙醇，推廣使用含乙醇 10% 的汽油（稱為 E10）；中國大陸有些省分也仿效推廣使用 E10 汽油。理論上，含乙醇的汽油雖較節省石油，但不是更好的燃料，因為乙醇燃燒所產生的熱量不比汽油（碳氫化合物）高。

燃燒熱的定義，是每一莫耳物質與氧作用燃燒後所釋放的能量，單位為仟卡 / 莫耳（kcal/mol）或仟焦 / 莫耳（kJ/mol）。以含碳氫氧的有機化合物（ $C_xH_yO_z$ ）而言，燃燒後產生 x 莫耳的氣態 CO_2 與 $y/2$ 莫耳的液態 H_2O ，並放出熱量，即燃燒熱（ H_c^0 ）：

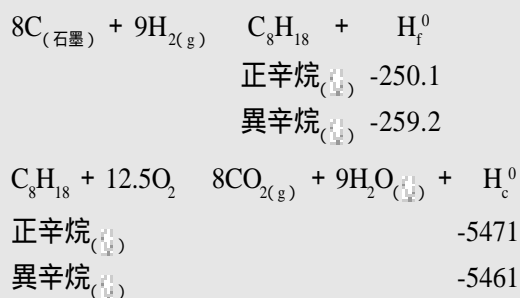
Green chemistry — 「綠色」化學的誤用

永續化學在英文中又稱 green chemistry，因 green 一字較為通俗，又有收成、獲利等特殊引申意義，故反較 sustainable 為常用；唯此處 green 非「顏色」之意，所以德文不譯作 grün，日文也不用「碧」、「綠」（[Green](#)）等字。

中國大陸的譯者不解原義，而將 green chemistry 譯成「綠色化學」，部分台灣學者竟然盲從，實有未妥〔註二〕。又，中國大陸譯 sustainable 一字為「可持續」，劉廣定教授認為，「可持續」亦不如「永續」達意，因此，本文仍用「永續化學」。



也就是說，每一個碳都氧化成為CO₂，每兩個氫都氧化成為H₂O，燃燒熱的大小與分子的化學結構有關。異構物愈安定者生成熱(H_f⁰)愈大而燃燒熱愈小，例如：



亦即，就安定性而言：正辛烷 < 異辛烷；就燃燒熱而言：正辛烷 > 異辛烷。

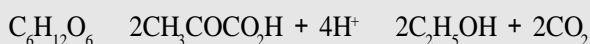
化合物分子中，碳的氧化態愈高，則氧化釋放出來的能量愈少，燃燒熱愈小。分子若含相同的碳、氫原子數，含氧多者則燃燒熱(kJ/mol)小。例如：乙烷(C₂H₆, 1560.7) > 乙醇(C₂H₆O, 1366.8) > 乙二醇(C₂H₆O₂, 1189.2)；丙烯(C₃H₆, 2058.0) > 丙酮(C₃H₆O, 1789.9) > 乙酸甲酯(C₃H₆O₂, 1592.2)。所以，作為燃料時的燃燒效果是碳氫化合物最好，醇類次之，羰基化合物再次，酯類更差。

再若比較乙醇和辛烷可知：4莫耳乙醇的燃燒熱為5467.2 kJ/mol，略等於燃燒熱為5471 kJ/mol的1莫耳正辛烷，或燃燒熱為5461 kJ/mol的1莫耳異辛烷。但4莫耳乙醇體積占233毫升，比1莫耳正辛烷(密度0.698 g/mL)或異辛烷(密度0.688 g/mL)的165毫升多了40%；這是用乙醇為燃料的一項缺點。

上述燃燒熱乃純物質的理論值。實用上，常以百萬焦/公斤(MJ/kg)或百萬焦/公升(MJ/L)，也有用英熱單位/磅(BTU/lb)表示某種混合燃料的「熱值」。且因燃燒生成的水會吸收熱量變成氣體，故實際產生的熱值較上述的燃燒熱為小。不同類燃料

產生的有效熱量不同，同類燃料因為燃燒方式(如內燃機種類)不同，產生的有效熱量也不同。

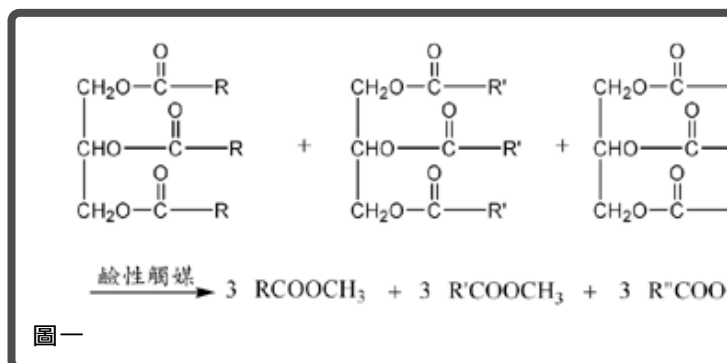
但有一種說法是，植物生長需要吸收CO₂，故可減低大氣中CO₂，對解決溫室效應問題有幫助。惟這種說法也可商榷，蓋植物生長吸收的CO₂，燃燒時也會釋放，能抵消多少，實難估計。但有一事實卻常為人所忽略，即葡萄糖分子因酵母菌進行酵解反應時，先分解產生兩分子丙酮酸(pyruvic acid)，丙酮酸再作用產生兩分子乙醇，同時放出兩分子CO₂，也就是說製造生質乙醇時，每生成1莫耳的乙醇，就必有1莫耳CO₂伴生：



換言之，4莫耳乙醇燃燒前後，總共釋放了12莫耳CO₂。與辛烷相比，乙醇不但占有體積較大，釋放CO₂也較多。另外，乙醇有吸水的特性，如何除水及如何防水，皆須特別處理。故就燃料的觀點來看，除了可以減少石油等化石能源的消耗量外，生質乙醇並無其他優點。

生質柴油的優缺點

柴油是指石油分餾，沸點300 以上的餾分，主成分是含15個碳以上的碳氫化合物，一般為卡車，大型車動力燃料所用。所謂生質柴油，是1980年代首由南非發展成功的石油燃料代用品，乃將組成向日葵籽油內的脂肪酸甘油酯成分，經過鹼性觸媒酯交換



反應，而和甲醇形成的脂肪酸甲酯混合物(fatty acid methyl esters , 簡稱 FAME)(圖一)。

1989 年奧地利以油菜籽油為原料，建立了全球第一家製造生質柴油的工廠。1990 年代起，其他一些歐洲國家和美國也紛紛由植物油或動物脂肪生產 FAME，混入一般柴油出售。也有人考慮將廢棄的回收食用油製作生質柴油。但回收的食用油裡，常含有脂肪

酸甘油酯因水解形成的脂肪酸(圖二)，在進行鹼性觸媒酯交換反應時，脂肪酸不但會破壞鹼性觸媒，也無法與甲醇酯化形成甲酯。雖改用酸性觸媒，可進行酯交換反應與酯化反應，但副產物多，不易純化。

為何依照美國標準，要在傳統柴油裡添加 2% 生質柴油呢？這是由於傳統的柴油中含較多硫、氮雜質，燃燒後產生的氧化物嚴重導致空氣汙染。美國原訂柴油含硫量不得超過 500ppm 的標準，已自 2006 年 10 月起改為不得超過 15ppm。惟有機硫化物含量減少後，柴油的黏性增大，不便利。如果混入 2% 生質柴油後，其流動性又能恢復舊觀，且此柴油實際含硫量大減，故能降低空氣汙染。

然而，若是添加太多生質柴油，則價格提高，燃燒產生的能量可能也減少。蓋上文已述及，酯類化合物的燃燒熱比同碳數碳氫化合物低，例如上述的乙酸

甲酯 (1592.2 kJ/mol) 比丙烷

(2219.2 kJ/mol) 為少，釋放的 CO₂ 也稍多。但 FAME 有引火點高(約 150)、密度較大(約 0.88 g/mL)、燃燒較完全、用為燃料時排放一氧化碳量低、未燃成分亦少的優點。目前許多歐洲國家已普遍使用含

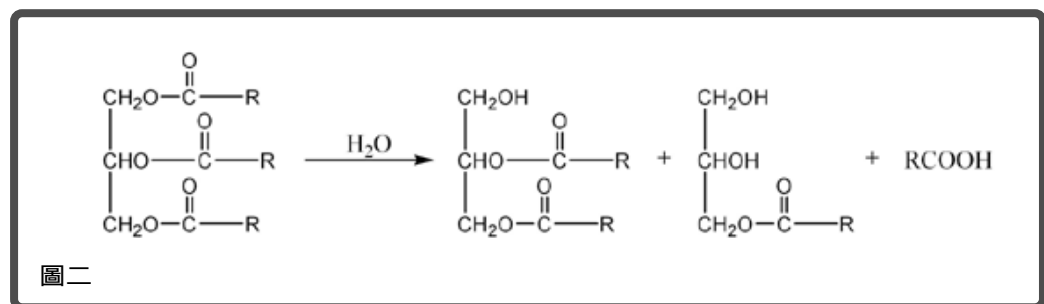
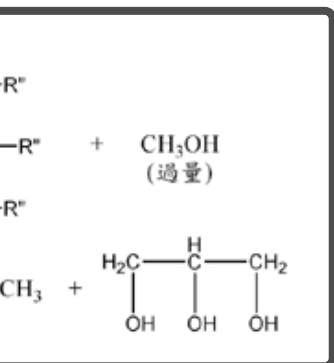
利用生質物必須考慮栽培、採集，以及壓搾、乾燥等需要能量的前處理，另在製成生質燃料時也都須消耗能量。究竟是消耗的多，還是生質燃料能供應的多？

FAME 量不等的燃料，荷蘭甚至鼓勵火力發電廠利用生質柴油為能源。

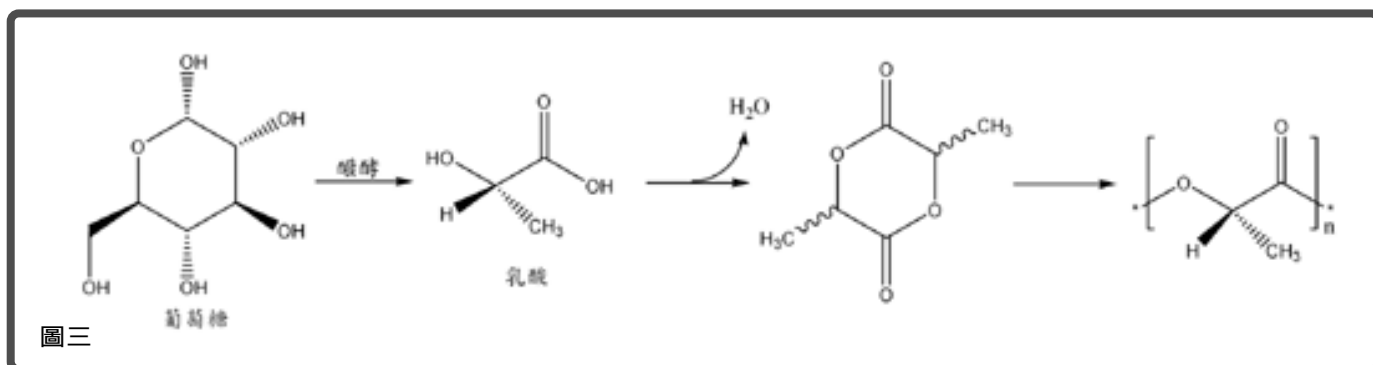
生質燃料再思考

利用生質物必須考慮栽培、採集，以及壓搾、乾燥等需要能量的「前處理」，另在製成生質燃料時也都須消耗能量。究竟是消耗的多，還是生質燃料能供應的多？相差多少？迄無定論。

再者，目前用來製造生質乙醇的生質物原料，如甘蔗、玉米、甘藷等，以及用來製造生質柴油的黃豆、菜籽等，實際上也多為人類食用作物，或是可用以飼養牲口的飼料，是否因此加重了糧食供應的問題呢？在地大、人口少的開發中國家如巴西，暫時不成問題；但若可耕地面積小、人口多的已開發國家，則絕對是不合適的。



圖二



以英國為例，如欲於 2010 年達到歐盟所預期——在汽油中添加 5% 生質乙醇，而這些乙醇不取自其他廢棄物，則全國 1/5 可耕地（1 萬 3000 平方公里）須種植可生產生質乙醇的作物才可以！但，台灣適合發展此技術嗎？

由於目前已知的生質物原料所能產出的生質燃料有限，為獲得更多生質燃料而須增加耕植面積、收成次數與收穫量，大量使用肥料、農藥，及耗損土質等違反永續發展的行為，在所難免。

另一方面，因棕櫚樹每畝產油 5950 公升，是目前已知產量僅次於「中國油樹」（Chinese tallow，又稱佛州白楊）的高等植物，印尼和馬來西亞近年以焚燒方式清除大片熱帶雨林而改種棕櫚，不但釋放出大量 CO_2 ，更可能嚴重破壞了整體生態環境，這恐是追求「永續能源」者所始料未及吧。

當前的多數化學原料也得自石油、煤焦和天然氣等化石資源，故研發以生質物為原料，代替部分化石資源製造化學品，乃永續化學發展主流之一。例如，乙醇可當做燃料，也可代替乙烯製成約 30 種基本化

學品；葡萄糖可以醱酵產生乙醇作為燃料，也可醱酵產生乳酸後，經聚合製成具有生物分解性的聚乳酸（polylactic acid）（圖三），還可與不同酵素作用，轉變成一些特殊的化學品，如己二酸（adipic acid）（圖四）等。

台灣農地面積有限，能收穫的蔗糖或葡萄糖量也有限，哪一種才是最好的利用方式呢？

據悉國外已有許多新的發展。例如，有人找到可以有效分解纖維素為葡萄糖的酵素；也有人已開發出有效分離木本植物中纖維素和木質素的方法，並可利用木質素為能源；還有人發現，可從非食用植物取得植物油以製作生質柴油。或許大家應該慎重考慮，什麼是適合台灣的研發方向吧。

註一：有關永續化學的簡介，請參閱 2002 年《科學月刊》33 卷三期 254~261 頁，與四期 344~351 頁。

註二：請參閱 2002 年《科學月刊》33 卷一期 82~83 頁。

劉廣定：台大名譽教授

